تعیین مسیر فشار بهینه در فرآیند هیدروفرمینگ ورق بااستفاده از روش تبرید تدریجی*

(یادداشت پژوهشی)

عباس هاشمی[۱]		محمد حسین پور[۲]		سید محمدحسین سیدکاشی[۳]

چکیده *در فرآیندهای شکل‌دهی ورق، تولید قطعات مخروطی-استوانه‌ای در یک مرحله و با دقت بالا به‌دلیل وجود عیوب چروکیدگی و پارگی بسیار دشوار است. یکی از کاراترین روش‌ها در میان فرآیندهای هیدروفرمینگ ورق به‌منظور تولید قطعات مخروطی- استوانه‌ای، روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی است. در این مقاله مسیر فشار شکل‌دهی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در این فرآیند، مورد بررسی قرار گرفت و در یک روش جدید با ترکیب روش اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار انسیس و بهینه‌سازی با الگوریتم تبرید تدریجی، مسیر بهینهٔ فشار به‌دست آمد.*

واژه‌های کلیدی قطعات مخروطی- استوانه‌ای; کشش عمیق هیدرودینامیکی; الگوریتم تبرید تدریجی; روش اجزای محدود; مسیر فشار.

Determination of Optimal Pressure Path in Sheet Hydroforming Process Using Simulated Annealing Method

A. Hashemi		M. Hoseinpour		S.M.H. Seyedkashi

Abstract *In sheet metal forming processes, one-stage production of conical-cylindrical parts with high accuracy is very difficult due to wrinkling and rupturing. Hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure is one of the most applicable procedures in sheet hydroforming process on the point of producing conical-cylindrical parts. In this paper, forming pressure path is investigated as one of the most important parameters of this process. The optimized pressure path is obtained utilizing a new procedure by combination of the finite element method using ANSYS/LS-DYNA and an optimization method using simulated annealing.*

Key Words Conical-Cylindrical Parts; Hydrodynamic Deep Drawing; Simulated Annealing Algorithm; Finite Element Code; Pressure path.

*تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۹/٤ و تاریخ پذیرش آن ۹٤/٦/۲۱ می‌باشد. DOI: 10.22067/fum-mech.v28i1.41691

(۱) دانشجوی دکتری دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی.

(۲) نویسندهٔ مسئول: استادیار، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی. m.hoseinpour@srttu.edu

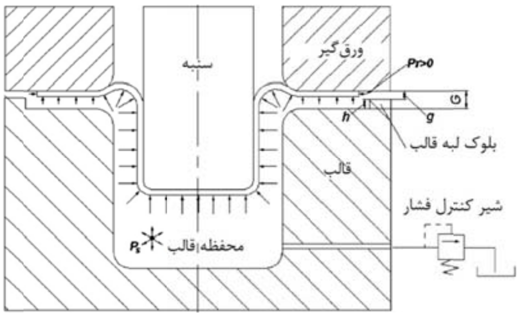
(۳) استادیار، دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند.

مقدمه

قطعات مخروطی و سهموی در صنعت هوا و فضا، صنایع نظامی، صنایع خودروسازی، لوازم آشپزخانه و دیگر صنایع کاربردهای فراوانی دارند. هم‌چنین در صنعت هوایی (موتورهای پیستونی، موتور جت، توربین گاز، بالگردها و تجهیزات پرتاب‌کننده‌های موشک به فضا) و در صنعت دریایی و ناوبری (کشتی‌های سطحی و زیردریایی‌ها) و در صنایع نظامی (تانک‌ها و موشک‌ها) و در ماشین‌آلات صنعتی (تجهیزات اسپینینگ، کمپرسورها و ماشین‌آلات قالب‌گیری) و در تجهیزات کشاورزی و وسایل نقلیه (اسنوموبیل‌ها و قایق‌ها) از قطعات مخروطی متنوعی استفاده می‌شود. شکل‌دهی این قبیل قطعات با روش‌های متداول کشش عمیق به‌راحتی امکان‌پذیر نیست و با مشکلاتی همراه است. دو مشکل عمده در تولید قطعات مخروطی، پارگی و چروکیدگی هستند. سطح تماس کم ورق و سنبه در مراحل اولیهٔ شکل‌دهی تنش زیادی در ناحیهٔ تماس ورق با سر سنبه ایجاد می‌کند و موجب پارگی ورق می‌گردد. از طرفی سطح آزاد ورق در ناحیهٔ بین نوک سنبه و ورق‌گیر موجب می‌شود تا در هنگام کشیده شدن ورق، در ناحیه مخروطی چروک ایجاد شود [1]. در سال‌های اخیر فن‌آوری هیدروفرمینگ به‌منظور تولید قطعات متنوع و پیچیده، در کاربردهای مختلف به‌ویژه در تولید قطعات خودرو، هواپیما و تجهیزات الکتریکی مورد توجه زیادی قرار گرفته است [2]. ابداعات متعددی در زمینهٔ هیدروفرمینگ ورق ارائه شده است که می‌توان به هیدروفرمینگ استاندارد [3]، هیدروریم [4]، کشش عمیق هیدرودینامیکی [5]، کشش عمیق هیدرومکانیکی [6] و کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [7] اشاره نمود. فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، با تغییر اندکی در ساختار ابزار در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی توسعه یافته است که شماتیکی از این فرآیند در شکل (۱) نمایش داده شده است [7]. در هر دو فرآیند مذکور، ورق توسط عمل مکانیکی سنبه به داخل محفظهٔ قالب شکل داده می‌شود. نفوذ سنبه به داخل محفظهٔ روغن، افزایش فشاری را ایجاد می‌کند که با استفاده از یک شیر کنترل فشار قابل تنظیم است. ورق کشیده‌شده به‌علت ایجاد فشار در زیر آن، به‌طور کامل به طرف سنبه پرس می‌شود. این امر اصطکاک بین سنبه و ورق را افزایش می‌دهد و بنابراین نیروهای بالاتری در مقایسه با کشش عمیق سنتی به ناحیهٔ تغییر شکل انتقال داده می‌شود [8]. درضمن سیال در محفظهٔ قالب می‌تواند از فاصلهٔ بین ورق و قالب به سمت بیرون جریان یابد. در این شرایط به‌علت کوچک بودن گپ بین قالب و ورق‌گیر، فشار سیال در اطراف ورق ایجاد می‌شود. این فشار شعاعی در اطراف ورق، نیروی کشش را کاهش و نسبت کشش را افزایش می‌دهد. هم‌چنین به‌کمک این فرآیند مزیت‌های بسیاری از قبیل کیفیت سطح مطلوب، دقت ابعادی بالا و شکل‌دهی قطعات با منحنی‌های پیچیده حاصل می‌شود. ابزار به‌کار رفته در این روش در مقایسه با سایر فرآیندهای هیدروفرمینگ ورق، بسیار ساده‌تر و بدون نیاز به وسایل آب‌بندی خاص است [9].

در زمینهٔ بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر در فرآیند هیدروفرمینگ ورق برای قطعات مخروطی-استوانه‌ای تحقیقات محدودی انجام شده است. پالانیسوامی و همکارانش [10] با ترکیبی از روش اجزای محدود و بهینه‌سازی معمولی، ابعاد بهینه ورق را به‌منظور کاهش برگشت فنری قطعهٔ نهایی به‌دست آوردند. لنگ و همکارانش [11] در فرآیند هیدروفرمینگ ورق آلومینیومی، با در نظر گرفتن پارامترهای شبیه‌سازی شامل ضریب استحکام، توان کرنش سختی، اصطکاک بین ورق-سنبه و اصطکاک بین ورق-قالب، برخی پارامترهای کلیدی فرآیند شامل ابعاد قالب و فشار پیش بالج را با مدل‌سازی معکوس مورد بررسی قرار دادند و

بهینه نمودند. چوی و همکارانش [12] با ترکیب تحلیل اجزای محدودِ تطابقی با الگوریتم کنترل فازی، پارامترهای فشار هیدرولیکی و نیروی ورق‌گیر در هیدروفرمینگ گرم را برای قطعات استوانه‌ای بررسی نمودند. یعقوبی و همکارانش [13] با استفاده از ترکیب الگوریتم تبرید تدریجی و آموزش شبکهٔ عصبی، مسیر فشار بهینه را در فرآیند هیدروفرمینگ مورد بررسی قرار دادند.



شکل ۱ اجزای قالب فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی [7]

برای شکل‌دهی قطعهٔ مخروطی سالم در فرآیند کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی، مسیر فشار نقش مهم و تعیین‌کننده‌ای ایفا می‌کند. در این مقاله روش جدیدی با عنوان تبرید تدریجی برای بهینه‌سازی مسیر فشار فرآیند مذکور پیشنهاد شد. به‌منظور دست‌یابی به مسیر فشار مناسب، الگوریتم تبرید تدریجی به‌عنوان یک روش بهینه‌سازی فراابتکاری در ترکیب با کد اجزای محدود ANSYS/LS-DYNA مورد استفاده قرار گرفت. در این روش با تصدیق مدل اجزای محدود در یک معیار شکست، دست‌یابی به قطعهٔ مطلوب با بهترین توزیع ضخامت به‌عنوان تابع هدف در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از الگوریتم تبرید تدریجی با نمونهٔ تجربی حاصل از مسیر بهینهٔ فشار به‌صورت توزیع ضخامت در قطعهٔ نهایی مقایسه و اعتبارسنجی شد.

مواد و مراحل آزمایش

مواد. برای انجام آزمایش‌ها از ورق مس خالص (۹۹/۹٪) با ضخامت ۱ میلی‌متر و قطر گردهٔ ۱۱۸ میلی‌متر، به‌منظور شکل‌دهی فنجان‌های مخروطی-استوانه‌ای در یک مرحله با روش کشش عمیق هیدرودینامیکی با فشار شعاعی استفاده شد. برای تعیین خواص مکانیکی مواد، آزمون کشش بر روی یک نمونه انجام شد که نتایج و برخی مشخصات فیزیکی آن در جدول (۱) ارائه شده است.

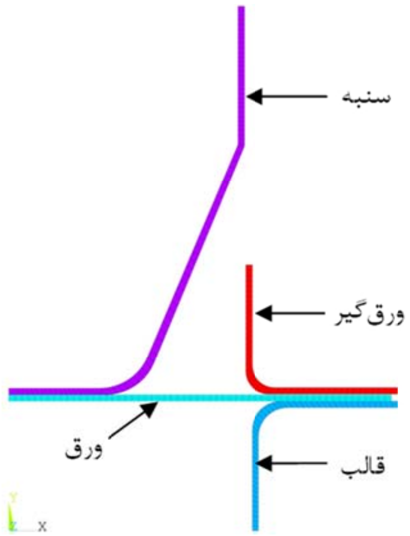
جدول ۱ خواص فیزیکی و مکانیکی ورق و اجزای قالب

ماده	مس خالص	اجزای قالب
مدول یانگ (GPa)	۱۱۷	۲۱۰
ضریب پواسون	۰/۳۲	۰/۳
تنش تسلیم (MPa)	۱۲۳	–
ضریب استحکام (MPa)	۵۳۰/۹۸	–
توان کرنش سختی	۰/٤٤	–

آزمایش. برای انجام آزمایش‌ها از یک دستگاه پرس هیدرولیک با ظرفیت ۲۰۰KN استفاده شد. در هنگام انجام آزمایش‌ها با حرکت سنبه به درون محفظهٔ قالب، فشار سیال افزایش می‌یابد و بدین‌صورت فشار مورد نیاز برای شکل‌دهی تأمین می‌گردد. برای بهبود بخشیدن به جریان فلز در ابتدای فرآیند، فشار اولیهٔ محدودی توسط واحد هیدرولیکی در زیر ورق اعمال می‌گردد و سپس هم‌زمان با حرکت سنبه و افزایش فشار درون محفظهٔ قالب، ورق به داخل قالب کشیده می‌شود. پس از رسیدن فشار سیال به مقدار بیشینه، شیر کنترل فشار عمل می‌کند و از آن پس عملیات شکل‌دهی با فشار ثابت انجام می‌گیرد. در این پژوهش، گپ بین قالب و ورق‌گیر (G) با ایجاد بلوکی در لبهٔ ورق‌گیر ایجاد شده و از هیچ اورینگی برای آب‌بندی استفاده نشده است و تماس بین ورق‌گیر و قالب (g) به‌صورت فلز با فلز است.

مدل اجزای محدود

به‌منظور کاهش زمان اجرای کد اجزای محدود در حین فرآیند بهینه‌سازی، المان دوبعدی متقارن PLANE 162 در نرم‌افزار انسیس استفاده شد. نمونه‌ای از مدل اجزای محدود در شکل (۲) نمایش داده شده است. قالب، ورق‌گیر و سنبه به‌صورت جسم کاملاً صلب تعریف شد. درحالی‌که ورق از خواص مواد پلاستیسیته قانون توان تبعیت می‌کند. مواد ورق که به‌صورت همسان‌گرد فرض شده و خواص مواد سایر اجزای مجموعهٔ قالب (قالب، ورق‌گیر و سنبه) در جدول (۱) ارائه شده است. قالب و ورق‌گیر به‌طور کامل مقید شده است و سنبه می‌تواند تنها در راستای عمودی منطبق با محور مرکزی خود حرکت کند. قید فشار در تمام سطح زیرین ورق و هم‌چنین در لبهٔ ورق اعمال شده است. نتایج حاصل از آنالیز حساسیت نشان داد که تعداد المان‌ها در راستای طولی برابر طول ورق و در راستای ضخامت چهار برابر ضخامت ورق مطلوب خواهد بود. مقدار ضریب اصطکاک در مدل اجزای محدود برای سطح تماس سنبه–ورق برابر ۰/۱۴ و برای سطوح مشترک ورق–قالب و ورق–ورق‌گیر ۰/۰۴ در نظر گرفته شده است [14].



شکل ۲ مدل المان‌بندی شده در شبیه‌سازی

روش بهینه‌سازی تبرید تدریجی

روش تبرید تدریجی نخستین بار توسط کرکپاتریک و همکارانش [15] در سال ۱۹۸۳ در حل مسائل بهینه‌سازی ترکیبی پیشنهاد شد. این روش توسعه‌ای بر روش مونت کارلو بود که توسط متروپلیس به‌منظور تعیین وضعیت تعادل از مجموعهٔ اتم‌ها در هر دمای داده‌شده ارائه گردید [16]. بهینه‌سازی با الگوریتم تبرید تدریجی در مسائل مهندسی به‌طور وسیعی گسترش یافته است. در الگوریتم تبرید تدریجی از عملیات حرارتی آنیل‌کردن الهام گرفته می‌شود که در این فرآیند وقتی یک فلز سرد می‌شود، به یک ساختار بلوری با حداقل انرژی و اندازهٔ بلور بزرگ‌تر منجمد می‌شود و عیوب در ساختار فلزی کاهش می‌یابد [17]. در الگوریتم تبرید تدریجی فرض می‌شود سیستم از یک دمای بالا با انرژی زیاد، به‌آرامی در حال سرد شدن است. در حقیقت این الگوریتم به‌صورت جستجوی تصادفی به‌دنبال یافتن کمترین مقدار انرژی در هر دما برای تابع هدف می‌باشد [18] . مهم‌ترین مزیت این روش در مقایسه با روش‌های تکرارشوندهٔ مشابه توانایی جستجو در فضاهای بزرگ و امکان بالاروی و خروج از کمینه‌های محلی است. ساختار کلی الگوریتم تبرید تدریجی می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود [19]:

الف) تعریف دمای اولیه.
ب) تعریف دمای نهایی.
ج) تعریف تابع سرمایش.
د) تعریف تعداد زنجیره مارکوف.
ه) تعریف متغیر تصادفی اولیه.
و) تکرار الگوریتم جستجو در یک دمای ثابت به‌اندازهٔ تعداد زنجیرهٔ مارکوف (ایجاد متغیر جدید و بررسی آن با شرط پذیرش).
ز) کاهش دما.
ح) تصدیق شرایط همگرایی و در غیر این‌صورت به مرحلهٔ (و) رجوع شود.
ط) پایان.

چهارچوب اصلی الگوریتم تبرید تدریجی براساس متغیرهای ورودی، تابع هدف، معیار شکست، تابع پذیرش و زمان‌بندی الگوریتم تعریف می‌شود. در این پژوهش متغیر ورودی در بهینه‌سازی فرآیند هیدروفرمینگ ورق، فشار بیشینه در نظر گرفته شد. در واقع تولید قطعهٔ سالم با استفاده از فشار بیشینهٔ بهینه، هدف اصلی فرآیند هیدروفرمینگ ورق تعریف می‌شود. بنابراین، تابع هدف، دست‌یابی به قطعهٔ مطلوب با بهترین توزیع ضخامت بیان می‌شود. هنگامی‌که قطعه‌ای کمترین مقدار نازک‌شدگی را داشته باشد، به‌عنوان قطعه مطلوب با بهترین توزیع ضخامت انتخاب می‌شود. در چنین شرایطی با محاسبهٔ فاصلهٔ گره‌های المان‌های دو سطح بیرونی ورق از یکدیگر می‌توان کمترین مقدار نازک‌شدگی حاصل از پس‌پردازشگر اجزای محدود در هر قطعه را به‌دست آورد. بنابراین در هر مرحله، با درنظر گرفتن یک فشار بیشینهٔ جدید به‌عنوان متغیر ورودی، انرژی جدید از تحلیل اجزای محدود حاصل خواهد شد. در شرایطی که کمترین مقدار نازک‌شدگی تعیین گردد، فشار بیشینهٔ بهینه به‌دست خواهد آمد.

در الگوریتم تبرید تدریجی احتمال این‌که متغیر پیشنهادشده مورد قبول واقع شود براساس معیار پذیرش متروپلیس $P(\Delta E)$ تعیین می‌گردد [۱۵]. در شرایطی که تغییرات انرژی منفی باشد متغیر پیشنهادشده پذیرفته می‌شود و در غیر اینصورت احتمال پذیرش آن توسط رابطهٔ $P(\Delta E)$ مورد بررسی قرار می‌گیرد. درصورتی‌که احتمال پذیرش متروپلیس از یک مقدار تصادفی در بازهٔ صفر و یک بیشتر باشد، متغیر پیشنهادشده پذیرفته می‌شود و جایگزین وضعیت جاری می‌گردد و در غیر این‌صورت با رد متغیر پیشنهادشده، وضعیت جاری بدون تغییر باقی می‌ماند و مجدداً متغیر جدید دیگری پیشنهاد می‌شود. این چرخه به‌منظور دست‌یابی به داده‌های مناسب تا رسیدن الگوریتم به شرایط انجماد ادامه می‌یابد.

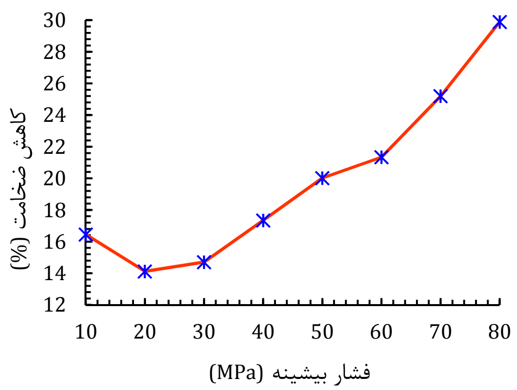
الگوریتم بهینه‌سازی توسط یک کد واسط (در محیط نرم‌افزار MATLAB) با نرم‌افزار ANSYS/LS-DYNA با استفاده از زبان طراحی پارامتریک انسیس (APDL) ترکیب می‌شود و خروجی‌های حاصل از تحلیل نرم‌افزار ANSYS را بررسی می‌نماید و بر همین اساس متغیرهای جدید را انتخاب می‌کند. پیش از این‌که متغیر جدید توسط احتمال پذیرش متروپلیس در الگوریتم بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گیرد، ابتدا نتیجهٔ متغیر جدید حاصل از مدل اجزای محدود توسط معیار شکست کنترل می‌شود. درصورتی‌که نتیجهٔ حاصل از مدل اجزای محدود در معیار شکست تعریف‌شده صدق کند، می‌تواند به‌عنوان یک متغیر جدید در شرط احتمال پذیرش $P(\Delta E)$ بررسی شود. در این پژوهش معیار شکست براساس معیار حداکثر نازک‌شدگی به‌همراه انطباق شکل نهایی قطعه با سنبه تعریف شده است. سطح نازک‌شدگی ۳۰٪ به‌عنوان حداکثر مقدار احتمالی برای قطعهٔ نهایی در معیار شکست فرض شد [20]. با در نظر گرفتن این معیار در شرایطی که ضخامت ورق از مقدار ۰/۷ میلی‌متر کمتر شود (ضخامت اولیهٔ ورق ۱ میلی‌متر)، متغیر پیشنهادشده مورد قبول واقع نخواهد شد. انطباق شکل نهایی قطعه با سنبه با محاسبهٔ فاصلهٔ گره‌های المان‌های سطح بالایی ورق نسبت به گره‌های المان‌های بیرونی سنبه در قسمت مخروطی کنترل می‌شوند. درصورتی‌که فاصلهٔ این گره‌ها از مقدار ۰/۲ میلی‌متر بیشتر باشد، این نتیجه از چرخهٔ الگوریتم حذف خواهد شد. علت تعریف این معیار انطباق به‌جهت جلوگیری از وجود هرگونه عیب شامل چروکیدگی و عدم دقت ابعادی شکل نهایی قطعه با سنبه در شکل‌دهی با فشارهای بیشینه پایین است.

تابع سرمایش، دمای اولیه، دمای نهایی و زنجیرهٔ مارکوف از جمله پارامترهای مؤثر در زمان‌بندی الگوریتم هستند. هرکدام از این پارامترها در فرآیند جستجو می‌تواند در رسیدن به کمینهٔ هم‌گرایی اصلی و

جلوگیری از به دام افتادن در نواحی کمینهٔ محلی مؤثر باشد. در این مقاله برای تابع سرمایش از رابطهٔ لگاریتمی (۱) استفاده شد [21].

$$T_k = \frac{T_{k-1}}{1+\ln(k+1)}\ ,k = 1, 2, \ldots \qquad (۱)$$

دمای اولیه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای زمان‌بندی الگوریتم بهینه‌سازی، برمبنای اختلاف بیشترین و کمترین مقادیر تابع هدف ($max\Delta E$) بدون درنظر گرفتن معیار شکست به‌ازای احتمال ۵۰ درصدی پذیرش متغیرهای تصادفی (P_0)، برابر ۵ درجه درنظر گرفته شد [22]. دمای نهایی (شرایط انجماد) الگوریتم برمبنای حداکثر تعداد دماهای استفاده‌شده ۲۰ مرتبه و حداقل اختلاف انرژی ۰/۰۰۱ تعریف شد. طول زنجیرهٔ مارکوف به‌صورت ثابت و برابر ۳۰ درنظر گرفته شد. طول زنجیرهٔ مارکوف، تعداد تکرار حلقهٔ داخلی در یک دمای ثابت به‌منظور جستجوی کمترین مقدار انرژی می‌باشد. بهترین شیوه برای انتخاب مناسب این پارامترها سعی و خطا انجام است.



شکل ۳ نمودار حاصل از اعمال مسیر فشارهای با فشار بیشینهٔ مختلف در شبیه‌سازی

در این پژوهش به‌منظور تعیین فضای جستجو، مسیرهای بارگذاری با فشارهای بیشینهٔ مختلف در شبیه‌سازی اجزای محدود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مدل اجزای محدود نشان داد که بازهٔ ۵ تا ۸۰MPa در معیار ۳۰٪ نازک‌شدگی صدق می‌کند، اما باتوجه به روند صعودی درصد کاهش ضخامت در فشارهای بالا، به‌منظور کاهش زمان الگوریتم می‌توان کران بالای فضای جستجو را به ۴۰MPa کاهش داد (شکل ۳).

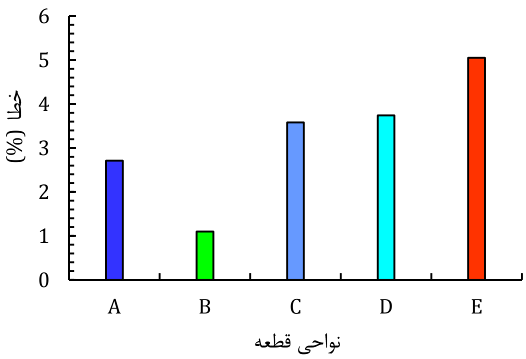
نتایج و بحث

به‌منظور بررسی تأثیر مسیر فشار به‌عنوان یکی از عوامل بسیار مهم در قابلیت شکل‌پذیری قطعات مخروطی در فرآیند هیدروفرمینگ، دو نوع روش بهینه‌سازی مسیر بارگذاری شامل نوع اول: مسیر فشار با سرعت متغیر سنبه، نوع دوم: مسیر فشار با سرعت ثابت سنبه مورد بررسی قرار گرفت.

مسیر فشار با سرعت متغیر سنبه. در این نوع بارگذاری، با تغییر فشار بیشینه به‌طور هم‌زمان سرعت سنبه نیز تغییر می‌کند. در این شرایط بعد از انجام تعداد ۲۰۱ تحلیل اجزای محدود و صدق نمودن در معیار شکست، شرط همگرایی ارضا می‌شود و تابع هدف (کمینهٔ نازک‌شدگی) به مقدار ۱۳/۰۳درصد همگرا می‌شود. نتیجهٔ حاصل از بهینه‌سازی با الگوریتم تبرید تدریجی، مقدار ۲۱/۱MPa برای فشار بیشینهٔ نهایی می‌باشد.

مسیر فشار با سرعت ثابت سنبه. سرعت ثابت مورد استفاده در این حالت برابر با شیب بهینه‌شدهٔ حاصل از بارگذاری نوع دوم می‌باشد. با استفاده از بارگذاری نوع دوم علاوه بر تعیین فشار بیشینهٔ بهینه‌شده، مسیر فشار بهینه نیز حاصل خواهد شد. در این شرایط بعد از تعداد ۲۱۵ شبیه‌سازی مورد قبول در معیار شکست، تابع هدف در مقدار ۱۳/۰۲درصد همگرا می‌شود. بهینه فشار بیشینه در این نوع بارگذاری، مقدار ۲۱MPa به‌دست آمد.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی نشان می‌دهد که مقادیر همگرا شدهٔ تابع هدف در هر دو نوع بارگذاری، اختلاف بسیار ناچیزی (۰/۰۱درصد) دارد. بنابراین کافی است نتایج حاصل از بهینه‌سازی یکی از روش‌های بارگذاری برای اعتباربخشی با نتایج روش تجربی مقایسه شود. در پژوهش حاضر شکل هندسی قطعهٔ مخروطی به پنج ناحیه تقسیم‌بندی می‌شود: انتهای تخت مخروط ناقص (A)، شعاع نوک مخروطی (B)، دیوارهٔ مخروطی (C)، شعاع‌گذار مخروطی- استوانه‌ای (D) و دیواره استوانه‌ای (E). باتوجه به شکل (٤) بیشترین مقدار نازک‌شدگی در ناحیه شعاع نوک مخروطی (B) به‌عنوان بحرانی‌ترین ناحیه رخ می‌دهد، بنابراین خروجی تحلیل اجزای محدود به‌ازای پارامتر ورودی فشار بیشینه، مقدار نازک‌شدگی در این ناحیه است. بیشترین و کمترین مقدار خطا برابر ۵/۰۵ و ۱/۱ درصد، به‌ترتیب مربوط به نواحی E و B می‌باشد. با توجه به این‌که ناحیهٔ B در مقایسه با سایر نواحی قطعه، دارای کمترین مقدار خطا یعنی ۱/۱ درصد می‌باشد و خروجی تحلیل اجزای محدود نیز در این ناحیه واقع است، می‌توان نتیجه گرفت تطابق مناسبی بین نتایج تجربی و بهینه‌سازی وجود دارد.



شکل ٤ بیشترین درصد اختلاف بین منحنی‌های توزیع ضخامت نمونه‌های بهینه‌سازی و تجربی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش ترکیبی الگوریتم تبرید تدریجی و تحلیل اجزای محدود به‌منظور بهینه‌سازی مسیر فشار برای هر نوع قطعهٔ مخروطی و استوانه‌ای به‌عنوان یک روش جدید در فرآیند هیدروفرمینگ ورق، پیشنهاد شد و تدوین و اعتبارسنجی گردید. برای دست‌یابی به دقت بالاتر در این الگوریتم، پارامترهای اصلی آن شامل تابع سرمایش، دمای اولیه، شرایط انجماد و طول زنجیره مارکوف مطابق با فرآیند مناسب‌سازی شد. بهینه‌سازی مسیر فشار با دو نوع بارگذاری سرعت متغیر و سرعت ثابت سنبه انجام گردید. در ابتدا بهینه مسیر فشار با سرعت متغیر سنبه با استفاده از الگوریتم به‌دست آمد و سپس شیب حاصل از این نوع بارگذاری در روش سرعت ثابت سنبه مورد استفاده قرار گرفت. درنهایت مقدار بهینه فشار حاصل از ترکیب الگوریتم تبرید تدریجی و تحلیل اجزای محدود، ۲۱/۱MPa برای بارگذاری مسیر فشار با سرعت متغیر سنبه و ۲۱MPa برای بارگذاری مسیر فشار با سرعت ثابت به‌دست آمد. مسیر فشار حاصل از بهینه‌سازی در نمونه آزمایشگاهی هیدروفرمینگ ورق اعمال شد. مقایسهٔ کمینه ضخامت در قطعه تحت مسیر فشار بهینه در نمونهٔ آزمایشگاهی و بهینه‌سازی، صحت روش ترکیبی بهینه‌سازی و تحلیل اجزای محدود در این پژوهش را دلالت نمود. بنابراین الگوریتم تبرید تدریجی به‌عنوان یک روش ترکیبی در فضاهای جستجوی وسیع در روش هیدروفرمینگ ورق، بازدهی مناسبی را در تعیین مسیر فشار مطلوب و طراحی سایر پارامترهای مؤثر در آن فرآیند خواهد داشت.

مراجع

1. Hashemi, A., Mashhadi, M., Bakhshi Jooybari, M. and Gorji, A., "Study of the effect of material properties and sheet thickness on formability of conical parts in hydro-mechanical deep drawing

assisted by radial pressure", Advanced Materials Research, Vol. 445, pp. 149-154, (2012).
2. Lang, L., Danckert, J. and Nielsen, K.B., "Study on hydromechanical deep drawing with uniform pressure onto the blank", Int. J. Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, pp. 495–502, (2004).
3. Thiruvarudchelvan, S. and Lewis, W., "A note on hydroforming with constant fluid pressur", J. Materials Processing Technology, Vol. 88, pp. 51–56, (1999).
4. Zhang, S.H., Wang, Z.R., Xu, Y., Wang, Z.T. and Zhou, L.X., "Recent developments in sheet hydroforming technology", J. Materials Processing Technology, Vol. 151, pp. 237–241, (2004).
5. Lang, L.H., Wang, Z.R., Kang, D.C., Yuan, S.J., Zhang, S.H., Danckert, J. and Nielsen, K.B., "Hydroforming highlights: sheet hydroforming and tube hydroforming", J. Materials Processing Technology, Vol. 151, pp. 165–177, (2004).
6. Thiruvarudchelvan, S. and Travis, F.W., "Hydraulic pressure enhanced cup drawing processes an appraisal", J. Materials Processing Technology, Vol. 140, pp. 70–75, (2003).
7. Lang, L. and Danckert, J., "Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy", J. Materials Processing Technology, Vol. 148, pp. 119–131, (2004).
8. Khandeparkar, T. and Liewald, M., "Hydromechanical deep drawing of cups with stepped geometries", J. Materials Processing Technology, Vol. 202, pp. 246-254, (2008).
9. Lang, L., Danckert, J. and Nielsen, K.B., "Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure Part II. Numerical analysis of the drawing mechanism and the process parameters", J. Materials Processing Technology, Vol. 166, pp. 150-161, (2005).
10. Palaniswamy, H., Ngaile, G. and Altan, T., "Optimization of blank dimensions to reduce springback in the flexforming process", J. Materials Processing Technology, Vol. 146, pp. 28–34, (2004).
11. Lang, L., Li, T., Zhou, X., Kristensen, B.E., Danckert, J. and Nielsen, K.B., "Optimized decision of the exact material modes in the simulationfor the innovative sheet hydroforming method", J. Materials Processing Technology, Vol. 177, pp. 692–696, (2006).
12. Choi, H., Koc, M. and Ni, J., "Determination of optimal loading profiles in warm hydroforming of lightweight materials", J. Materials Processing Technology, Vol. 190, pp. 230–242, (2007).
13. Yaghoobi, A., Baseri, H., Bakhshi-Jooybari, M., Gori, A., "Optimization of Pressure Path in Sheet Hydroforming Process Using Artificial Intelligence and Simulated Annealing", Advanced Materials Research, Vol. 622, pp. 772-779, (2014).
14. Liu, X., Xu, Y. and Yuan, Sh., "Effects of Loading Paths on Hydrodynamic Deep Drawing with Independent Radial Hydraulic Pressure of Aluminum Alloy Based on Numerical Simulation", J. Material Science and Technology, Vol. 24, pp. 395-399, (2008).
15. Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D. andVecchi, M.P., "Optimization by Simulated Annealing", Science,Vol. 220, pp. 671-680, (1983).
16. Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller, A. and Teller, E., "Equation of state calculations by fast computing machines", J. Chemical Physics, Vol. 21, pp. 1087-1092, (1953).
17. Yang, X.Sh., "Nature-Inspired Optimization Algorithms", pp. 67–75, Elsevier, (2014).
18. Seyedkashi, S.M.H., Moslemi Naeini, H., Liaghat, G.H., Mosavi Mashhadi, M. and Moon, Y.H., "Numerical and experimental study on the effect of expansion ratio, corner fillets and strain rate in warm hydroforming of aluminium tubes", Modares Mechanical Engineering, Vol. 12, No. 5, pp. 122-131, (2012). (In Persian)

19. Mirzaali, M., Seyedkashi, S.M.H., Liaghat, G.H., Moslemi Naeini, H., Shojaee, K. and Moon, Y.H., "Application of simulated annealing method to pressure and force loading optimization in tube hydroforming process", Int. J. Mechanical Sciences, Vol. 55, pp. 78–84, (2012).
20. Papadia, G., Del Prete, A., Spagnolo, A. and Anglani, A., "Pre-Bulging influence on an inverse drawn shape obtained with Hydromechanical Deep Drawing(HDD)", Int. J. Material Forming, Vol. 3, pp. 287- 290, (2010).
21. Seyedkashi, S.M.H., Moslemi Naeini, H., Liaghat, G.H., Mosavi Mashhadi, M., Mirzaali, M., Shojaee, K. and Moon, Y.H., "The effect of tube dimensions on optimized pressure and force loading paths in tube hydroforming process", J. Mechanical Sciences and Technology, Vol. 26, No.6, pp. 1817–1822, (2012).
22. Seyedkashi, S.M.H., Moslemi Naeini, H., Liaghat, G.H., Mosavi Mashadi, M., Shojaee Ghandashtani, K., Mirzaali, M. and Moon, Y.H., "Experimental and Numerical Investigation of Simulated Annealing Technique in Optimization of Warm Tube Hydroforming, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers", Part B, J. Engineering Manufacture, Vol. 226, No.11, pp. 1869–1879, (2012).